

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26247066

研究課題名（和文）量子テレポーテーションを基礎にした時間領域多重量子情報処理の研究

研究課題名（英文）Research on time-domain multiplexed quantum information processing based on quantum teleportation technology

研究代表者

古澤 明（FURUSAWA, AKIRA）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：90332569

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,100,000円

研究成果の概要（和文）：帯域100MHzの時間領域量子非破壊相互作用ゲートを作製することに成功した。また、その入力として高純度シュレーディンガーの猫状態生成に成功した。さらに、連続量量子テレポーテーション装置を用いた単一光子量子ビットテレポーテーションの時間領域多重化（多光子化）として、量子トリットの量子テレポーテーションに成功した。これらから極限コヒーレント通信に用いる複雑な量子力学的操作実現のために必須な、時間領域多重量子情報処理の基盤技術を確立することができた。

研究成果の概要（英文）：We succeeded in building a broadband time-domain quantum non-demolition (QND) gate with 100MHz bandwidth. For the input of the QND gate, we succeeded in creation of a highly pure Schrodinger's cat state. We succeeded in deterministic teleportation of qutrit, i.e., superposition of three orthogonal photonic states, with our continuous-variable teleporter. Here it is impossible to do so for a conventional linear-optics teleporter. Thus we we succeeded in establishing fundamental technologies for ultimate coherent communication.

研究分野：量子光学、量子情報、量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス 量子コンピューター

1. 研究開始当初の背景

現在、光通信の通信容量が、その古典物理学的限界値に達しようとしている。光は光子の集合体と考えられるが、古典物理学的な光では光子間の相関が無く、光子がランダムに飛来する。そのため、ショットノイズと呼ばれる量子ノイズが存在し、それが通信容量を制限するためである(シャノン限界)。したがって、高度情報化社会の更なる発展のためには、古典物理学的限界(シャノン限界)を破った、光通信の通信容量向上の研究が必須である。また、通信容量は単位エネルギーあたりに送れる情報量で定義されるので、通信容量が上がれば、単位情報量あたり伝送に必要とされるエネルギーが減る。したがって、震災後の日本の将来を考えても、シャノン限界を破った、光通信の通信容量向上の研究が強く望まれる。つまり、超大容量=超低消費エネルギー光通信の研究が望まれる。実際、光ファイバーネットワークには多数の中継器=光ファイバーアンプが存在しているが、その消費エネルギーは膨大である。これもひとえに、ショットノイズに負けないレベルに信号光を強くし、S/N比を保つためである。光ファイバーアンプの数を減らし、究極にはこれを無くしても、光通信のS/N比を十分保てる手法の確立は非常に重要である。

このような状況で、通信容量の追求が始まりつつある。現在研究されており実用化に近いコヒーレント光通信では原理的には古典物理学的限界(シャノン限界)の通信容量を実現できる。コヒーレント光通信実現が視野に入ったと言うことは、シャノン限界の通信容量が、近い将来実現されることになる。したがって、研究開発としてはさらに次を目指すことになる。つまり、シャノン限界を超えた通信容量の追求である。これが本研究の強い動機となっている。本研究代表者らは現在、「極限コヒーレント光通信」の実現を目指しているが、そこでは、コヒーレント光通信の受信機において量子力学的操作(量子情報処理)を施すことによりショットノイズを回避し、シャノン限界を遙かに超えて光通信の通信容量を飛躍的に上げることができる(たとえば、M. Sasaki et al., Phys. Lett. A 236, 1 (1997))。

2. 研究の目的

本研究では、以上の状況に鑑み、極限コヒーレント光通信に必要な量子力学的操作、もう少し具体的に言うと、レーザー光の状態であるコヒーレント状態およびその重ね合わせであるシュレーディンガーの猫状態に対する量子力学的操作を探求する。特に、極限コヒーレント光通信に用いる複雑な量子力学的操作実現のために必須な時間領域多重の手法を探求する。

本研究で探求する量子力学的操作は、本研究の代表者が長年研究開発を行い、現在では世界標準となった連続量量子テレポーテーション(A. Furusawa et al., Science 282,

706 (1998)、平成29年5月現在の被引用回数1854回)の手法を用いて行う。具体的には、量子テレポーテーションの補助入力として、行いたい量子力学的操作を施した状態を予め準備し、入力と補助入力間の量子エンタングルメントにより、を任意の入力に対してテレポートする(量子ゲートテレポーテーション:図1)。この方法の大きな利点は、任意の入力に対して量子力学的操作 $\hat{U}$ を施す必要が無く、予めわかっている1つの状態 $|c\rangle$ にのみ $\hat{U}$ を施せば良いことである。この利点を用いれば、従来は共振器QED(量子電磁力学)効果を用いなければできなかった、単一光子レベルでの光スイッチのような非線形光学効果を、特定の状態に対してのみ施すことで(そのような状態を生成するだけで)、任意の入力に対しても施すことができるようになる。

本研究代表者らは量子ゲートテレポーテーションとして、スクイーズ操作(位相敏感増幅)のテレポーテーションに成功している。ここでは、補助入力であるスクイーズされた真空場に施されているスクイーズ操作を、入力である単一光子状態にテレポートし、コヒーレント状態の重ね合わせであるシュレーディンガーの猫状態の生成に成功している(Y. Miwa et al., Phys. Rev. Lett. 113, 013601 (2014)、図2参照)。また、同じ装置により、シュレーディンガーの猫状態にスクイーズ操作を施し、単一光子状態の生成にも成功している。したがって、この実験の成功により、本研究代表者らは、シュレーディンガーの猫状態と単一光子状態を互いに他へ、状況に合わせて自由に変換できるようになった。

極限コヒーレント光通信実現のためには、種々の量子力学的操作を実現しなければならない。そのためには、ユニバーサル量子ゲートセットおよびそれを多数・多段階組み合わせた複雑な量子力学的操作を実現する必要がある。ここで、ユニバーサル量子ゲートセットとは、これに含まれる量子ゲートの組み合わせで、任意の量子力学的操作(量子情報処理)が可能となる量子ゲート群のことである。これは、通常のコンピュータのユニバーサルゲートに相当し、具体的にはNANDゲートのようなものである。本研究では、量

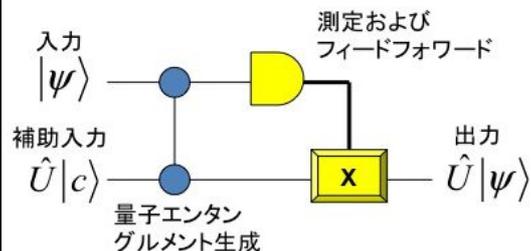


図1 量子ゲートテレポーテーション。

量子テレポーテーションにおいて、補助入力を  $\hat{U}|c\rangle$  とする。

報処理)が可能となる量子ゲート群のことである。これは、通常のコンピュータのユニバーサルゲートに相当し、具体的にはNANDゲートのようなものである。本研究では、量

子ゲートテレポーションにより実現されるユニバーサル量子ゲートセットを多数・多段階実行する基盤技術確立を目指す。

本研究代表者らは、最近、これらに関して極めて重大な成果を2つ挙げている。1つは連続量量子テレポーション装置を用いた単一光子量子ビットテレポーションの成功である(S. Takeda et al., Nature **500**, 315 (2013))。上述したように、本研究代表者らはシュレーディンガーの猫状態と単一光子状態を互いに他へ、状況に合わせて自由に変換できるため、この成功により、極限コヒーレント光通信に必要な量子力学的操作を、壊れやすいシュレーディンガーの猫状態に直接施す代わりに、壊れ難い単一光子状態へ施すことができるようになった。したがって、信頼性の高い量子力学的操作を実現するテクノロジーを得たことになる。

もう1つの大きな成果は、量子ゲートを多数・多段階組み合わせ合わせた複雑な量子力学的操作実現のために必要な、超大規模多者間量子エンタングルメント状態を、時間領域多重の手法を用いて生成に成功したことである(S. Yokoyama, Nature Photonics **7**, 982 (2013))。ここでは、従来法より3桁以上規模の大きな10000モード以上の多者間量子エンタングルメント状態生成に成功している。極限コヒーレント光通信実現のためには、量子ゲートを多数・多段階組み合わせ合わせた複雑な量子力学的操作を施す必要があるが、この成果と1つめの成果である単一光子量子ビットテレポーションの成功を組み合わせることができれば、複雑な量子力学的操作を信頼性高く実現するテクノロジーが得られ極限コヒーレント光通信実現に向けて大きく前進する。

以上から、本研究では次の2つの実現を目指す。連続量量子テレポーション装置を用いた単一光子量子ビットテレポーションの時間領域多重化(多光子化)、時間領域多重に対応可能な量子非破壊ゲートの実現である。ここで、量子非破壊ゲートとは図1において入力と補助入力との間のエンタングルメントを生成する部分であり、時間領域多重した量子力学的操作の入力の結合などに用いることができる。これらを実現し、極限コヒーレント光通信に用いる複雑な量子力学的操作実現のために必須な、時間領域多重量子情報処理の基盤技術を確立する。

### 3. 研究の方法

本研究では、連続量量子テレポーション装置を用いた単一光子量子ビットテレポーションの時間領域多重化(多光子化)、時間領域多重に対応可能な量子非破壊ゲートの実現を目指す。それぞれについて以下で説明する。

連続量量子テレポーション装置を用いた単一光子量子ビットテレポーションの時間領域多重化(多光子化)

これは、最近成功した連続量量子テレポーション装置を用いた単一光子量子ビットテレポーション(S. Takeda et al., Nature **500**, 315 (2013))の入力として、2光子・時間領域2モードで形成される量子トリット  $c_0|02\rangle + c_1|20\rangle + c_2|11\rangle$  (2つの時間波束のうち後ろの波束に光子が2個、前の波束に2個、両方の波束に1個ずつの場合の重ね合わせ)とすることである。これに成功すれば、これまでの線形光学素子ではテレポートできなかった量子状態をテレポートできるようになり、時間領域多重量子情報処理の基盤技術の1つが確立されたことになる。

### 時間領域多重に対応可能な量子非破壊ゲートの実現

量子非破壊ゲートは図1の量子ゲートテレポーションにおいて、入力と補助入力との間の量子エンタングルメントを生成する部

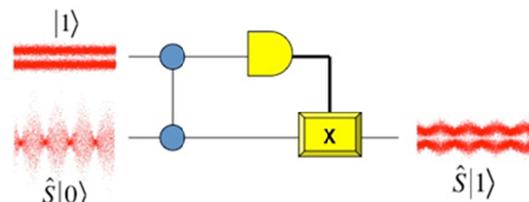


図2 量子ゲートテレポーションの例として、単一光子状態 $|1\rangle$ にスクイーズ操作を施し、シュレーディンガーの猫状態生成。

分である。

また、図2で示した、本研究代表者らが最近成功したスクイーズ操作のテレポーション(Y. Miwa et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 013601 (2014))の応用ともなっている。以下にこの量子非破壊ゲートについて詳しく説明する。

スクイーズ操作のテレポーションにおいて、入力と補助入力との間の量子エンタングルメントはビームスプリッターで生成することができる。しかし、一般の補助入力の場合、量子非破壊ゲートと呼ばれるエンタングリングゲートが必要となる。

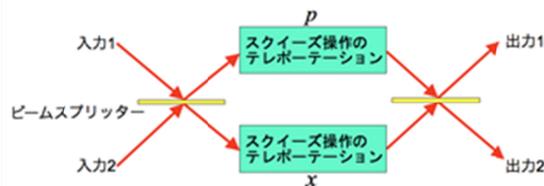


図3 量子非破壊ゲート。

また、この量子非破壊ゲートは図3のように、スクイーズ操作のテレポーション装置2台と2枚のビームスプリッターで構成で

きる。これを作製する場合、スクイーズ操作のテレポーテーション装置を2台同期して動作させる必要があるが、これが本課題における最も困難な点となる。特に、フィードフォワードの古典情報チャンネルを2チャンネル作る必要があり、これらは周波数分散ゼロかつ同期させる必要があるため、新たな技術開発が必要となる。

以上が実現すれば、時間領域多重量子情報処理の基礎技術を確立したことになり、極限コヒーレント光通信実現に大きく前進する。

#### 4. 研究成果

##### [平成26年4月-平成27年2月]

###### 計画

2台のスクイーズ操作のテレポーテーション装置を作製する。具体的には、広帯域光パラメトリック発振器2台と広帯域ホモダイン検出器2台を作製し、これらを用いて2台のスクイーズ操作のテレポーテーション装置を作製する。

###### 結果

100MHzの帯域で動作する2台のスクイーズ操作テレポーテーション装置(ユニバーサルスクイーズ)の作製に成功しその動作を確認した。共振器を用いた光スイッチを作製し、それを用いたオンデマンド単一光子源を動作させることに成功した。

##### [平成27年3月]

###### 計画

平成26年度のまとめを行い、平成27年度の計画を立てる。  
平成26年度の成果を論文化する。

###### 結果

関連する論文が Nature Photonics および Nature Communications に掲載された。また、平成26年度の成果の論文執筆を開始した。

##### [平成27年~平成28年3月]

###### 結果

26年度作製に成功した2台のスクイーズ操作のテレポーテーション装置を同期して動作させ量子非破壊相互作用ゲートを作製した。このとき、2つのフィードフォワード系を1つの光学系に作り込み同期が安定して行えるように設計した。入力をコヒーレント状態とし、100MHzの帯域で動作することを確認した。また、量子非破壊相互作用ゲートを改造し、100MHzの帯域で動作する位相不敏感増幅器の作製にも成功した。これらについて物理学会にて発表した。さらに、論文執筆を開始した。

##### [平成28年4月-平成29年2月]

###### 結果

昨年度に完成させた時間領域量子非破壊相互作用ゲートを用いて、シュレーディンガーの猫状態の量子非破壊測定とその時間反転に相当する操作を行うことを計画した。しかし、昨年度完成させた量子非破壊相互作用ゲートのフィデリティがそれほど高くないため、入力のシュレーディンガーの猫状態の純度が非常に高くないと古典限界を超えた操作は不可能であることが判明した。そこで計画を変更

し、高純度シュレーディンガーの猫状態生成を徹底的に追求することにした。その結果、原理的には理想極限である100%の純度を達成できる方法を見つけ、それを実験的に検証することができた。具体的には、世界最高純度である78%の純度のシュレーディンガーの猫状態生成に成功した。

これと昨年度に完成させた時間領域量子非破壊相互作用ゲートを組み合わせることにより、本研究の最終目的である、極限コヒーレン

ト光通信に用いる複雑な量子力学的操作実現のために必須な、時間領域多重量子情報処理の基盤技術を確立することができた。

##### [平成29年3月]

本研究全体のまとめを行い、研究結果を論文にまとめた。具体的には、時間領域量子非破壊相互作用ゲートと高純度シュレーディンガーの猫状態生成の論文を書いた。近日中に投稿予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計17件)

1. K. Nagano, Y. Enomoto, M. Nakano, A. Furusawa and S. Kawamura, "Mitigation of radiation-pressure-induced angular instability of a Fabry-Perot cavity consisting of suspended mirrors", Physics Letters A 380, refereed, 3871-3875 (2016), 10.1016/j.physleta.2016.09.056
2. T. Serikawa, J. Yoshikawa, K. Makino, and A. Furusawa, "Creation and measurement of broadband squeezed vacuum from a ring optical parametric oscillator", Optics Express 24, refereed, 28383-28391 (2016), 10.1364/OE.24.028383
3. J. Yoshikawa, S. Yokoyama, T. Kaji, C. Sornphiphatphong, Y. Shiozawa, K. Makino, and A. Furusawa, "Generation of one-million-mode continuous-variable cluster state by unlimited time-domain

multiplexing", APL Photonics 1, refereed, 060801 (2016), 10.1063/1.4962732

4. Y. Enomoto, K. Nagano, M. Nakano, A. Furusawa, and S. Kawamura, "Observation of reduction of radiation-pressure-induced rotational anti-spring effect on a 23 mg mirror in a Fabry-Perot cavity", Classical and Quantum Gravity 33, refereed, 145002 (2016), 10.1088/0264-9381/33/14/145002

5. S. Ng, S. Z. Ang, T. A. Wheatley, H. Yonezawa, A. Furusawa, E. H. Huntington, M. Tsang, "Spectrum analysis with quantum dynamical systems", Phys. Rev. A 93, refereed, 042121-1-10 (2016), 10.1103/PhysRevA.93.042121

6. K. Nagano, Y. Enomoto, M. Nakano, A. Furusawa, and S. Kawamura "New method to measure the angular antispring effect in a Fabry-Perot cavity with remote excitation using radiation pressure", Phys. Lett. A 380, refereed, 983-988 (2016), 10.1016/j.physleta.2016.01.007

7. K. Makino, Y. Hashimoto, J. Yoshikawa, H. Ohdan, T. Toyama, P. van Loock, and A. Furusawa, "Synchronization of optical photons for quantum information processing", Science Advances 2, refereed, e1501772 (2016), 10.1126/sciadv.1501772

8. K. Miyata, H. Ogawa, P. Marek, R. Filip, H. Yonezawa, J. Yoshikawa, and A. Furusawa "Implementation of a quantum cubic gate by adaptive non-Gaussian measurement", Phys. Rev. A 93, refereed, 022301-1-10 (2016), 10.1103/PhysRevA.93.022301

9. H. Ogawa, H. Ohdan, K. Miyata, M. Taguchi, K. Makino, H. Yonezawa, J. Yoshikawa, and A. Furusawa, "Real-time quadrature measurement of a single-photon wave packet with continuous temporal-mode matching", Phys. Rev. Lett. 116, refereed, 233602-1-5 (2016), 10.1103/PhysRevLett.116.233602

10. G. Masada, K. Miyata, A. Politi, T. Hashimoto, J. L. O' Brien, and A. Furusawa "Continuous-variable entanglement on a chip", Nature Photonics 9, refereed, 316-319 (2015), 10.1038/nphoton.2015.42

11. M. Fuwa, S. Takeda, M. Zwiernik, H. M. Wiseman, and A. Furusawa, "Experimental proof of nonlocal wavefunction collapse for a single particle using homodyne measurements", Nature Communications 6, 6665-6670 (2015), refereed, 10.1038/ncomms7665

12. S. Takeda, M. Fuwa, P. van Loock, and A. Furusawa, "Entanglement swapping between discrete and continuous variables", Phys. Rev. Lett. 114, refereed, 100501-1-5 (2015),

10.1103/PhysRevLett.114.100501

13. S. Yokoyama, R. Ukai, S. C. Armstrong, J. Yoshikawa, P. van Loock, and A. Furusawa "Demonstration of a fully tunable entangling gate for continuous-variable one-way quantum computation", Phys. Rev. A 92, refereed, 032304-1-8 (2015), 10.1103/PhysRevA.92.032304

14. K. Miyata, H. Ogawa, P. Marek, R. Filip, H. Yonezawa, J. Yoshikawa, and A. Furusawa "Experimental realization of a dynamic squeezing gate", Phys. Rev. A 90, refereed, 060302(R)-1-5(2014), 15.1103/PhysRevA.90.060302

3. M. Fuwa, S. Toba, S. Takeda, P. Marek, L. Mista Jr., R. Filip, P. van Loock, J. Yoshikawa, and A. Furusawa, "Noiseless conditional teleportation of a single photon", Phys. Rev. Lett. 113, refereed, 223602-1-5 (2014), 10.1103/PhysRevLett.113.223602

16. S. Yokoyama, R. Ukai, J. Yoshikawa, P. Marek, R. Filip, and A. Furusawa "Nonlocal quantum gate on quantum continuous variables with minimal resources", Phys. Rev. A 90, refereed, 012311-1-7 (2014), 10.1103/PhysRevA.90.012311

17. Y. Miwa, J. Yoshikawa, N. Iwata, M. Endo, P. Marek, R. Filip, P. van Loock, and A. Furusawa, "Exploring a new regime for processing optical qubits: Squeezing and unsqueezing single photons", Phys. Rev. Lett. 113, refereed, 013601-1-5 (2014), 10.1103/PhysRevLett.113.013601

[学会発表](計18件)

1. A. Furusawa (Invited), "Hybrid Quantum Information Processing", APCC AIP Congress 2016, Dec 6, 2016, Brisbane (Australia)

2. A. Furusawa (Invited), "Hybrid Quantum Information Processing", Frontiers in Optics/Laser Science Conference (FiO/LS), Oct 18, 2016, Rochester (USA)

3. A. Furusawa (Invited), "Hybrid Quantum Information Processing" The 25<sup>th</sup> International Conference on Atomic Physics (ICAP), July 25, 2016, Seoul (Korea)

4. A. Furusawa (Invited), "Hybrid Quantum Information Processing" Seoul Conference on Frontiers in QIS (SCFQIS) - a Satellite Meeting of ICAP 2016, July 23, 2016, Seoul (Korea)

5. A. Furusawa (Invited), "Hybrid Quantum Information Processing" Quantum and Nano Control, Apr.12, 2016, Minnesota (USA)

6. A. Furusawa(Invited), "Hybrid quantum

information processing”  
UTokyo-ANU Workshop on Quantum Information and Control, Mar. 9, 2016, The University of Tokyo (Tokyo・Hongo)

7. A. Furusawa (Invited), “Hybrid quantum information processing”  
ENS-UT workshop, Nov. 18, 2015, The University of Tokyo (Tokyo・Hongo)

8. A. Furusawa (Invited), “Hybrid quantum information processing”  
The 12th US-Japan Seminar, Sep. 23, 2015, Madison (USA)

9. A. Furusawa (Invited), “Hybrid quantum information processing”  
Conference on Quantum Information & Quantum Control, 19 Aug, 2015, Toronto (Canada)

10. A. Furusawa (Invited), “Hybrid quantum information processing”  
KITPC Program on Gravitational Waves, May 11, 2015, Taiyuan (China)

11. A. Furusawa (Invited), “Hybrid quantum information processing”  
Workshop on Multi-Photon Interferometry, May 7, 2015, Shanghai (China)

12. A. Furusawa(Invited), "Squeezing and cubic phase gates and the related technologies", Australian Institute of Physics Congress, Dec. 10, 2014, Canberra (Australia)

13. A. Furusawa(Invited), "Squeezing and cubic phase gates and the related technologies", Quantum Optics VII, Oct 30, 2014, Mar del Plata (Argentina)

14. A. Furusawa(Invited), "Hybrid quantum information processing"  
Okinawa School in Physics: Coherent Quantum Dynamics, Sep. 17-19, 2014, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, (Okinawa・Onna-son)

15. A. Furusawa(Invited), "Squeezing and cubic phase gates and the related technologies", The Principles and Applications of Control in Quantum Systems 2014 (PRACQSYS 2014), Aug. 8, 2014, Cambridge (UK)

16. A. Furusawa(Invited), "Realization of squeezing of single photons and a dynamic squeezing gate", Quantum Control Engineering: Mathematical Principles and Applications, July 22, 2014, Cambridge (UK)

17. A. Furusawa(Invited), "My dreams and quantum teleportation", The quantum optics frontier, Symposium in honor of Jeff Kimble's 65th birthday, Apr. 25, 2014, California (USA)

18. A. Furusawa(Invited), "Time-domain multiplexing for hybrid quantum

information processing", The 3<sup>rd</sup> Advanced Laser and Photon Sources (ALPS), Apr 23, 2014, Pacifico Yokohama (Kanagawa・Yokohama)

〔産業財産権〕  
出願状況（計 0 件）  
取得状況（計 0 件）

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.alice.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織  
(1)研究代表者  
古澤 明 (FURUSAWA, Akira)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号：90332569

(2)研究分担者  
吉川 純一 (YOSHIKAWA, Junichi)  
東京大学・大学院工学系研究科・講師  
研究者番号：60589943

(3)連携研究者  
( )

研究者番号：

(4)研究協力者  
( )